

Санкт-Петербургский государственный университет
Физический факультет
Кафедра радиофизики



**Визуализация стоячих акустических волн
при помощи паровой и газовой кавитации**

Выпускная квалификационная работа

Студента дневного отделения

Богданова Ивана Витальевича

Научный руководитель:

К.ф.-м.н., доцент Дружинин Григорий Александрович

Рецензент:

Д.ф.-м.н., Фомичев Александр Васильевич

Санкт-Петербург

2017

Содержание

1.	Введение.....	3
2.	Отражение акустических волн.....	4
3.	Кавитация.....	8
4.	Описание экспериментальной установки.....	11
5.	Наблюдаемые эффекты.....	16
6.	Выводы.....	28
7.	Список литературы.....	29

Введение

Картина стоячих волн описана во всех учебниках по акустике, однако эта картина зачастую идеализирована и не соответствует реальному эксперименту. Целью данной работы является визуализация стоячих волн при помощи паровой и газовой кавитации.

Была собрана экспериментальная установка и проведено несколько серий экспериментов, в результате которых, были получены фотографии распределения газовых и паровых пузырьков, возникающих при отражении акустических волн от мягкой и жесткой границ. Было исследовано отражение от плоской границы в цилиндрическом сосуде, картины отражения плоской волны от угла $\pm 45^\circ$ в аквариуме и получены снимки отражения плоской волны от сферической поверхности и уголкового отражателя.

Отражение акустических волн

Если на пути плоской волны находится плоское однородное препятствие, то оно вызывает в среде появление отраженной волны, бегущей навстречу падающей, в результате чего, возникает стоячая волна.

Для гармонической волны $p = A_0 e^{i(\omega t + kz)}$, падающей на жесткую границу, отраженная волна есть $\tilde{p} = A_0 e^{i(\omega t - kz)}$ и суммарное поле стоячей волны представляется в виде $p + \tilde{p} = 2 A_0 \cos kz \cos \omega t$ [1, 2], график этой функции представлен на (рис. 1). На границе (ось ординат) возникает пучность давлений.

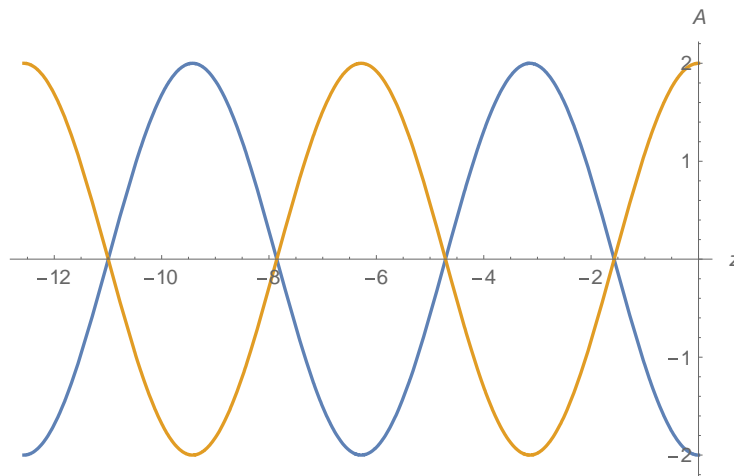


Рис.1. Стоячая волна с пучностью на границе (ось ординат).

Для гармонической волны $p = A_0 e^{i(\omega t + kz)}$, падающей на свободную границу, отраженная волна есть $\tilde{p} = -A_0 e^{i(\omega t - kz)}$ и суммарное поле стоячей волны представляется в виде $p + \tilde{p} = 2 A_0 \cos \left(kz - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ [2], такой график представлен на (рис.2). На границе (ось ординат) возникает узел т.е. давление обращается в ноль.

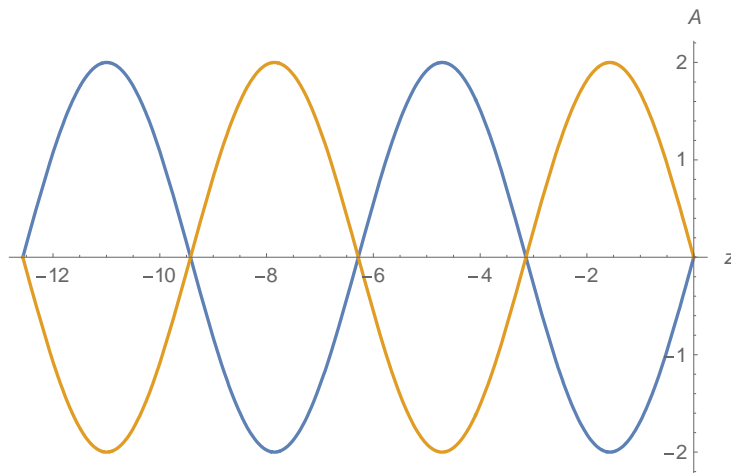


Рис.2. Стоячая волна с узлом на границе (ось ординат).

При неидеальной границе отраженная волна может иметь другую амплитуду т.е. функции \tilde{p} и p могут различаться. Если различие состоит только в постоянном множителе, так что для препятствия, расположенного в точке $z = 0$,

$$\tilde{p}\left(t + \frac{z}{c}\right) = R p\left(t + \frac{z}{c}\right)$$

то отражение называют правильным, а величину R – коэффициентом отражения.

Тогда для гармонических волн падающую и отраженную волны можно записать в виде

$$p = A e^{i(\omega t + kz)}, \tilde{p} = R A e^{i(\omega t - kz)}$$

Коэффициент отражения для нормального падения волны выражается по формуле Френеля[2]:

$$R = \frac{\rho' c' - \rho c}{\rho' c' + \rho c}$$

Коэффициент отражения для тонкого слоя (в нашем случае стекло) определяется по формуле [2]:

$R = \frac{-i\omega\mu - \rho c}{-i\omega\mu + \rho c}$, где μ – это сосредоточенная масса слоя стекла.

В случае отражения от уголка, картина выглядит несколько сложнее. Плоская гармоническая волна давления $p_1 = Ae^{i(\omega t + kz)}$ падает на отражающую поверхность в виде прямого угла. Когда падающая волна (1, рис.3) достигает отражающую поверхность, образуется отраженная волна (2, рис. 3). Эта отраженная волна достигает противоположную наклонную стенку и отражается вверх (3, рис. 1). Все эти волны изображены в последовательные моменты времени.

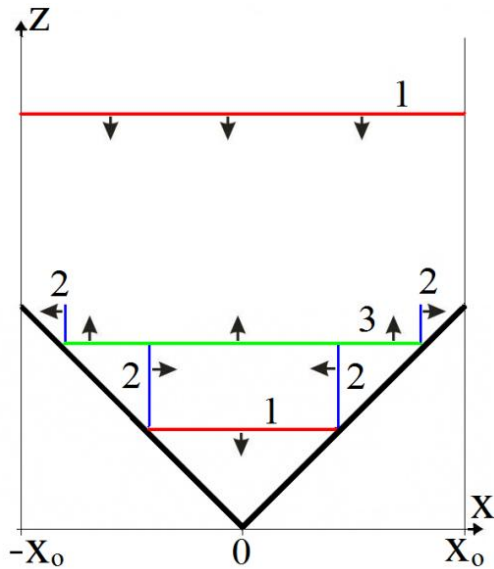


Рис.3. Геометрия процесса отражения

Давления в этих волнах будут: $p_1 = Ae^{i(\omega t + kz)}$, $p_{-2} = Ae^{i(\omega t + kx)}$, $p_{+2} = Ae^{i(\omega t - kx)}$, $p_3 = Ae^{i(\omega t - kz)}$. В произвольной точке внутри угла при $-x_0 < x < x_0$, $z > |x|$, суммарное давление равно

$$P = p_1 + p_{-2} + p_{+2} + p_3 = 2Ae^{i\omega t}(\cos kx + \cos kz)$$

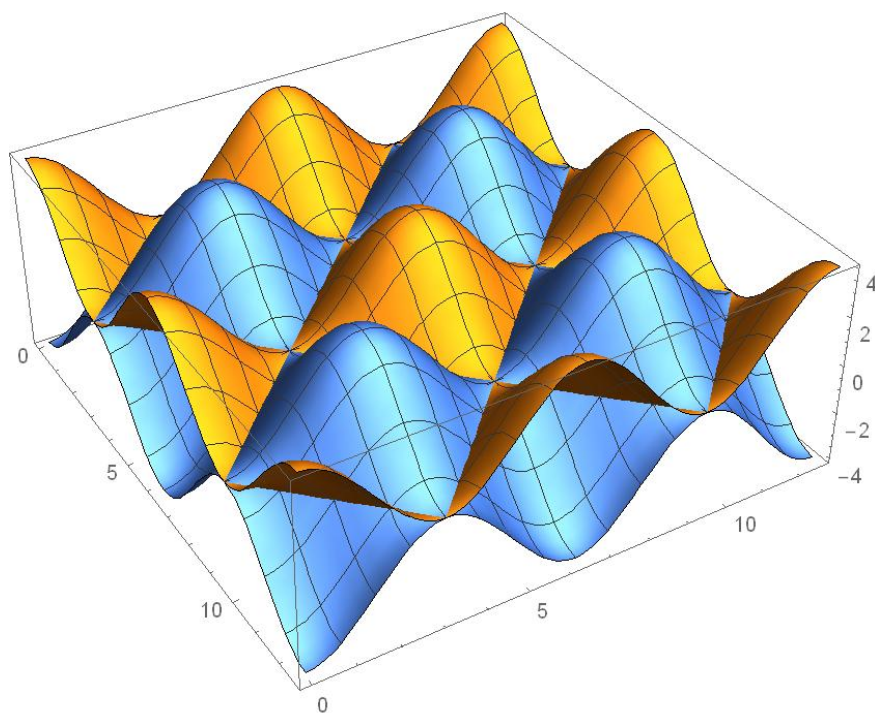


Рис. 4. Трехмерная стоячая волна в угле

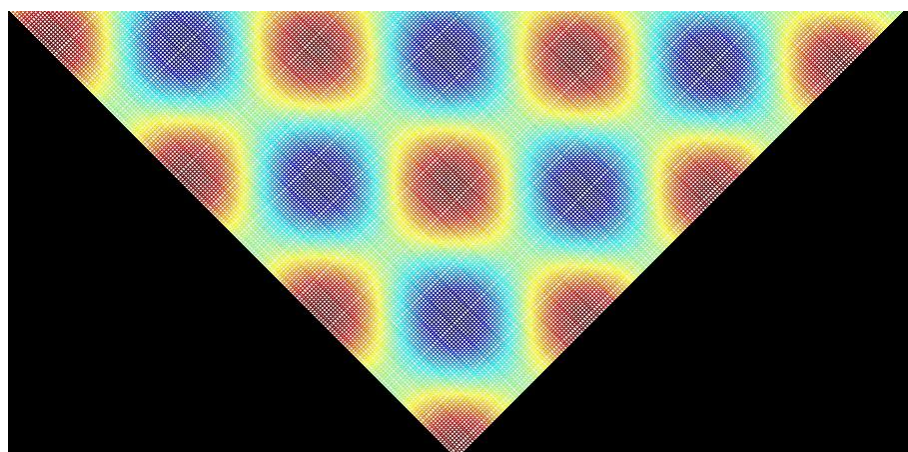


Рис. 5. Стоячая волна в угле.

Кавитация

В последнее время растет интерес к исследованию жидкостей, содержащих паровые и газовые пузырьки. Такие пузырьки или каверны возникают в жидкости в результате кавитации. В 1930-1970 гг. интерес к кавитации был обусловлен вопросами борьбы с эрозией, очисткой поверхностей от загрязнений и интенсификацией физико-химических процессов. В настоящее время актуальность исследований определяется применением кавитации в нанотехнологиях, синтезе новых веществ, разработкой новых способов переработки труднообогатимых руд и нефтепродуктов.[7]

Кавитация может быть вызвана различными физическими воздействиями разной природы на жидкость. Различают акустическую кавитацию, лазерную кавитацию, гидродинамическую кавитацию, электрогидравлический взрыв и т.д.[8] В данной работе рассматривается только акустическая кавитация.

Акустическая кавитация – это процесс образования, роста, периодических пульсаций и последующего схлопывания паровых и газовых пузырьков в жидкости под воздействием периодически изменяющегося давления. Частота пульсаций в жидкости может быть различной– от десятков герц до десятков мегагерц. Кавитация возбуждается и развивается в одной выделенной области жидкости, называемой кавитационной областью или кавитационным облаком. [3, 4, 8]

Кавитационное облако состоит из газовых и паровых пузырьков. Газовые пузырьки собираются в узлах стоячей волны, а паровые в пучностях. Кавитационная картина очень неустойчива и постоянно меняется во времени, потому что паровые пузырьки схлопываются на каждом периоде колебаний и возникают на следующем периоде в случайном новом месте.[3, 4] Зародышами для кавитации могут быть стабильные микро- и нанопузырьки, распределение которых по размеру имеет две группы с радиусами $\sim 1\text{ мкм}$ и $\sim 2\text{ нм}$. К первой группе можно отнести все зародыши с начальным радиусом $>0,01\text{ мкм}$, поскольку такие пузырьки становятся регистрируемыми практически

одновременно с пузырьками, растущими из 1мкм зародышей.[6] Каверны не образуются до тех пор, пока амплитуда пульсаций недостаточно велика и отрицательное давление в волне не падает до давления насыщенного пара или ниже.[5]

Поведение газового пузырька в жидкости может быть различным— чисто сферические пульсации, возникновение колебаний поверхности пузырька, при которых происходит нарушение сферической симметрии движения, трансляционное движение, взаимодействие и дробление пузырьков на более мелкие, возникновение кумулятивных микроструй и т.д.[8]

Теоретическое рассмотрение показывает, что движение пузырьков в ультразвуковом поле происходит неравномерно: замедляется при расширении и ускоряется при сжатии. Так как сжатие происходит в более короткий интервал времени по сравнению с периодом колебаний, то регистрируемое движение происходит рывками.[6]

Большая часть кавитационных эффектов связана с высокой концентрацией (кумуляцией) энергии в очень небольшом объеме газообразной жидкой среды. В ряде работ отмечается, что кавитационная кумуляция энергии является наиболее эффективным способом кумуляции из всех известных методов концентрации энергии и достигает величины 10^{12} . В данном случае речь идет об отношении плотности энергии в кавитационном пузырьке к плотности энергии акустического поля.[8]

Высокая плотность энергии в кавитационном пузырьке объясняется в первую очередь малым объемом вещества в момент достижения пузырьком минимального радиуса. По данным разных авторов, радиус пузырька при ультразвуковой кавитации в конце сжатия R_{min} может находиться в пределах 10^{-7} - 10^{-8} м при равновесном (начальном) радиусе $R_0=(1-10) \cdot 10^{-6}$ м. Таким образом, изменение объема пузырька (и плотности газа) составляет не менее 1000, что и вызывает экстремальную концентрацию первоначально запасенной пузырьком энергии.[8]

До настоящего времени не создано полностью адекватной физической модели процессов, сопровождающих пульсации кавитационного пузырька. Трудности интерпретации во многом связаны с чрезвычайно широким диапазоном изменения объема пузырька, плотности и температуры газа, а также малыми характерными интервалами времени (доли наносекунд).[8]

В линейном приближении поле стоячей акустической волны всегда рассчитывается достаточно легко, и его нетрудно построить, как можно видеть выше. В кавитирующей среде содержится большое количество паровых и газовых пузырьков, и первые и вторые меняют местную скорость звука по разному таким образом, что локальная скорость звука в наших экспериментах меняется 40000 раз в секунду, т. е. с частотой акустических колебаний, в результате которых осциллируют газовые пузырьки, а так же рождаются и схлопываются паровые пузырьки. В случае с кавитирующей жидкостью, когда локальная скорость звука неизвестная величина, нужно решать уравнение Новье-Стокса, но плотность и сжимаемость во всех точках разная из за разной концентрации пузырьков в воде, поэтому решение становится слишком сложным. Таким образом рассчитать акустическое поле в кавитирующей жидкости оказывается практически невозможно.

Нашей задачей является экспериментальная визуализация стоячих акустических волн в кавитирующей жидкости для поверхностей разной геометрии, таких как плоскость, двугранный угол, трехгранный угол и сферическая поверхность.

Описание экспериментальной установки

Для проведения эксперимента была собрана установка. Основной частью этой установки был мощный усилитель на MOSFET транзисторах.

Схема усилителя приведена на (рис. 6). Максимальная выходная мощность этого усилителя может быть больше 1 кВт. Усилитель собран по полумостовой схеме. На выходе усилителя включен трансформатор на ферритовых кольцах.

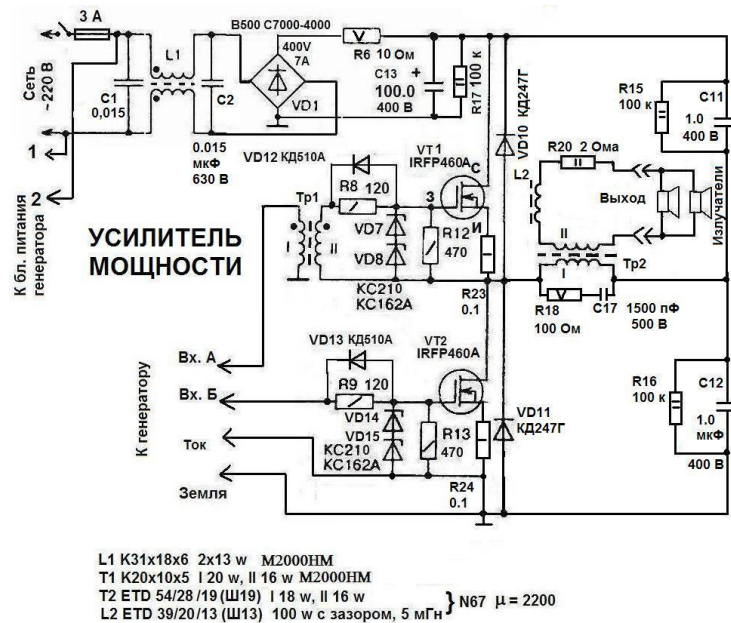


Рис. 6. Схема усилителя.

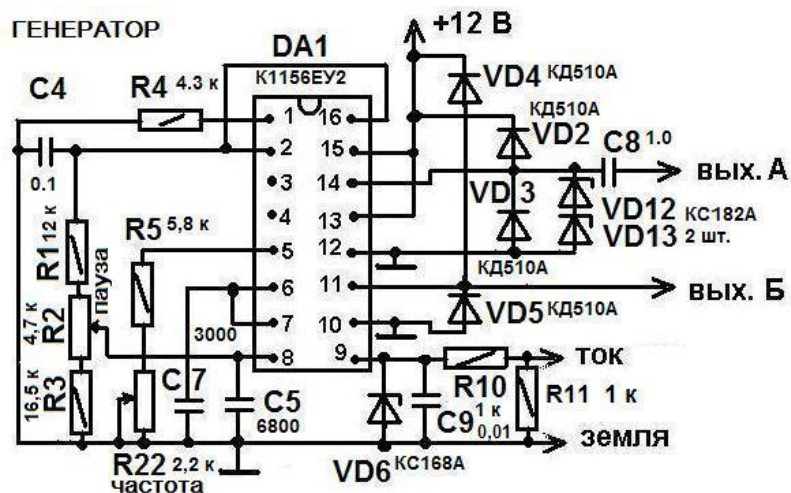


Рис.7. Схема генератора.

Пьезоизлучатель подключен ко вторичной обмотке выходного трансформатора через дроссель, индуктивность которого подбиралась для излучателя таким образом, чтобы фазы синусоидального выходного напряжения и тока совпадали. При этом мощность питания излучателя была максимальной. Диапазон рабочих частот усилителя был (37-50) кГц. Напряжение на излучателе было около 150 В. Ток в цепи питания для разных излучателей, имеющих разные резонансные частоты, менялся, от 0.1 до 0.4 А. Напряжение питания всегда было 300 В. Таким образом электрическая мощность, подаваемая на излучатель менялась от 30 до 120 Вт или от 1,5 до 6 Вт/см². Из многочисленных наблюдений установлено, что кавитация начинается при удельной мощности порядка 1 Вт/см². Акустическая мощность в опытах не измерялась. Оценить акустическую мощность можно из тех соображений, что детали усилителя при мощности 120 Вт практически не нагревались, а ток и напряжение на акустическом излучателе находились в фазе. На основании этого считали, что бóльшая часть акустической мощности излучается в виде акустической волны. В качестве источника света использовался диапроектор с лампой мощностью 90 Вт [1]. Блок-схемы установок приведены на (рис.8, 9, 10). Во всех установках источник света устанавливался с заднего торца сосуда.

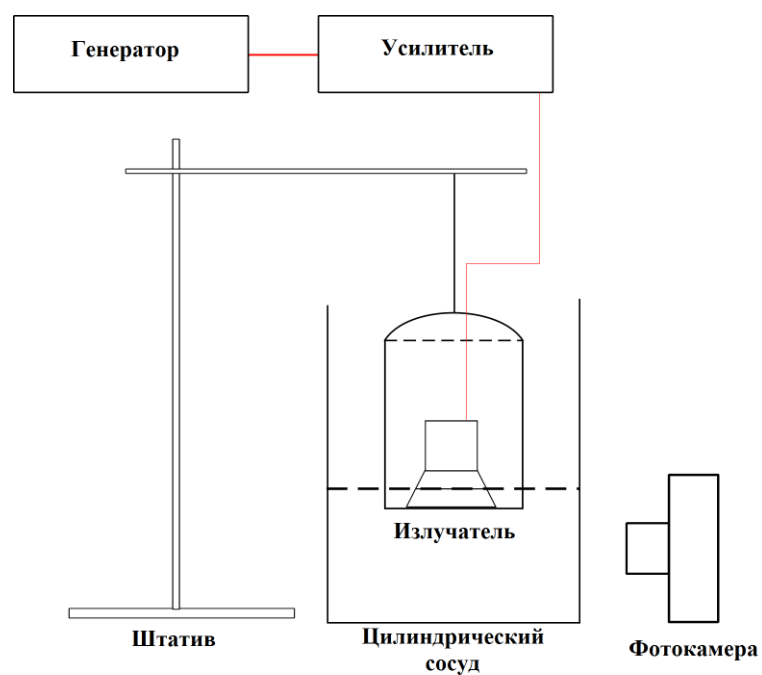


Рис. 8. Блок-схема установки для наблюдения кавитации в первом опыте.

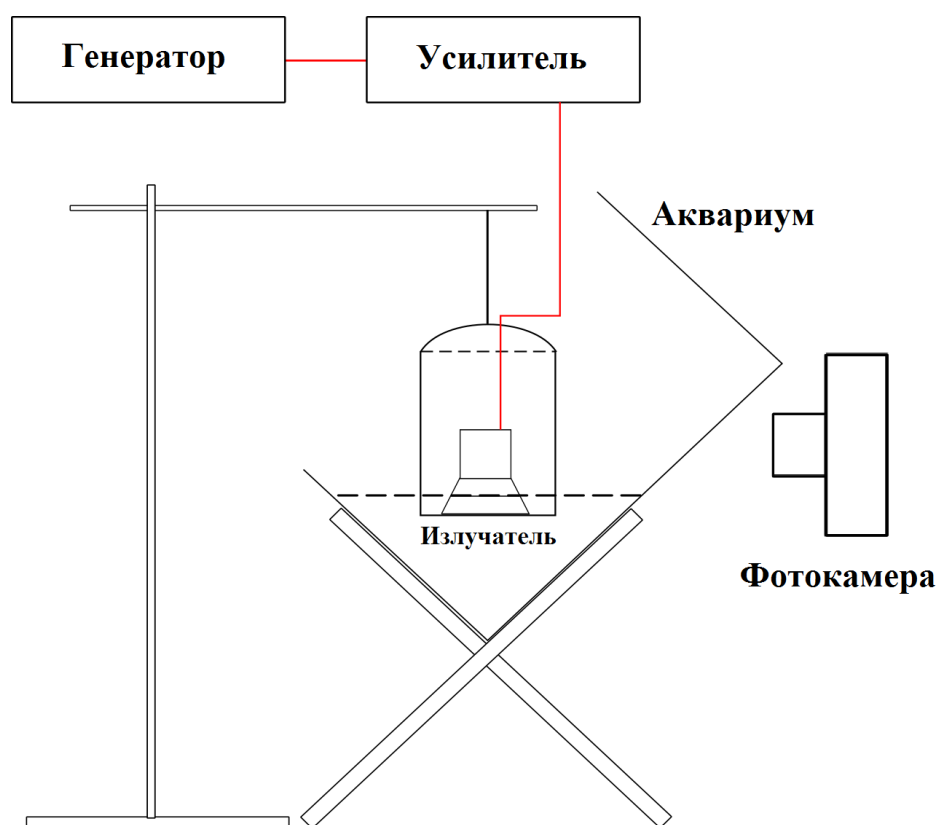


Рис. 9. Блок-схема установки для наблюдения кавитации во втором опыте.

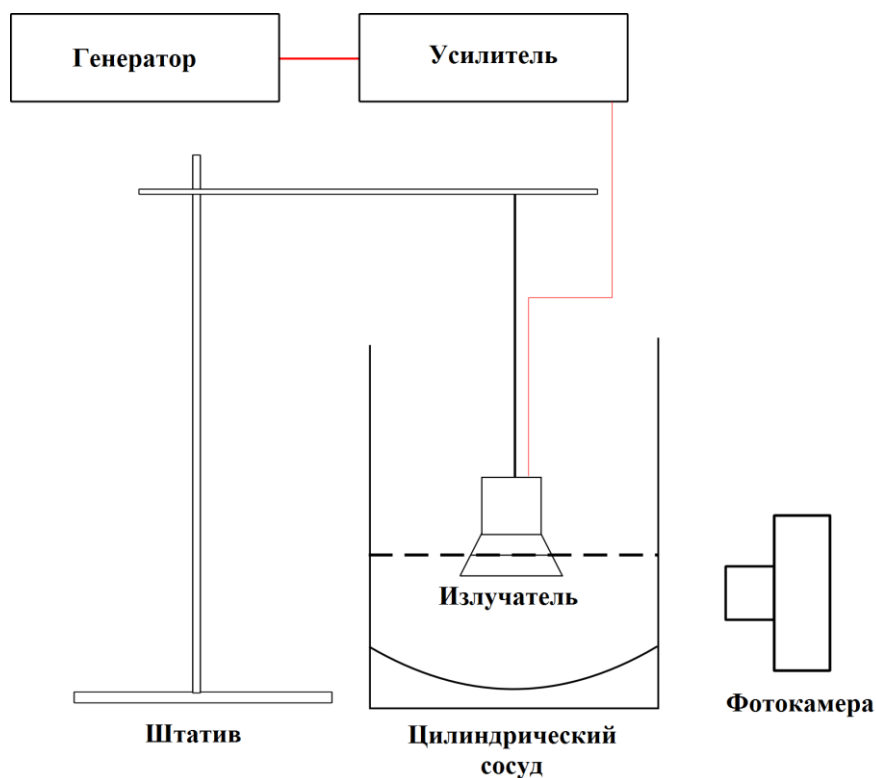


Рис. 10. Блок схема установки для наблюдения кавитации в четвертом опыте.

В первой установке использовался цилиндрический сосуд с диаметром 123 мм, высотой 200 мм и толщиной дна 8мм. Во второй установке использовался прямоугольный аквариум размерами 30х12х23 см с толщиной стенок 4,95мм.

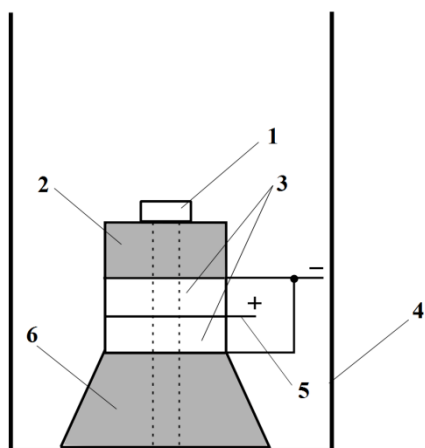


Рис. 11. Пьезоизлучатель. 1- стальной болт, 2- массивный стальной диск, 3- два пьезокерамических кольца, 4- жестяная банка, 5- контактная пластина, 6- алюминиевый конус.

В данной работе использовался самодельный излучатель, который состоял из двух пьезокерамических колец включенных как показано на (рис. 11). Конструкция излучателя была соединена стальным болтом. От натяжения болта зависела резонансная частота излучателя. Собственная резонансная частота пьезокерамических колец была около 200 кГц.

Характерной особенностью излучателя было то, что массивные насадки, использующиеся для понижения резонансной частоты, были сделаны из разных металлов. Верхняя тяжелая насадка была сделана из стали, а нижняя, излучающая насадка, из алюминия. [1]

Для того, чтобы увеличить излучающую поверхность, излучатель был приклеен внутри тонкостенного сосуда из луженой жести к его центральной части (см. рис.10).

Так как дно банки тонкое, оно могло колебаться не поршневым, а изгибным образом. Таким образом, данный излучатель излучал не совсем плоскую волну.

Наблюдаемые эффекты

В первом опыте использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой, показана на (рис. 8). Излучатель помещался в цилиндрический сосуд с водой таким образом, что излучающая поверхность была параллельна дну сосуда. В результате в жидкости возникала стоячая волна, которая сопровождалась акустической кавитацией. На (рис. 12 и 13) можно видеть фотографии стоячих волн, которые визуализированы кавитационными пузырьками.



Рис. 12. Картина стоячей волны.



Рис. 13. Картина стоячей волны.

На снимках видны достаточно четко различимые слои. Это пучности с высоким давлением акустической волны, в которых образуются паровые пузырьки, чередуются с узлами, где давление обращается в ноль, и куда собираются газовые пузырьки. Паровые пузырьки живут лишь половину периода акустической волны – в фазе разрежения. В полупериоде сжатия они исчезают и появляются в следующем полупериоде в другом случайном месте. За время выдержки фотоаппарата проходит много тысяч периодов. Поэтому области паровой кавитации выглядят на фотографиях размазанными.

Если предполагать, что волна плоская, то чередование должно происходить через четверть длины волны.

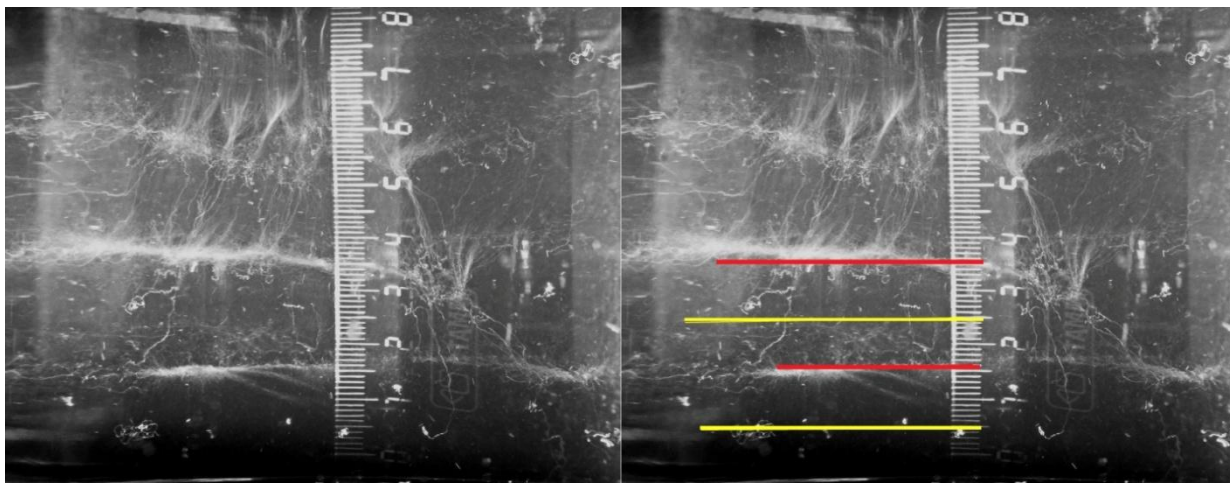


Рис. 14. Картина стоячих волн. Частота 39,8 кГц.

На (рис. 14) желтыми линиями отмечены узлы стоячей волны, а красными пучности. Длина волны здесь равна $\lambda=36$ мм.

При изменении частоты акустической волны картина кавитации очень быстро меняется и принимает различные вариации, например, (рис. 15 и 16).

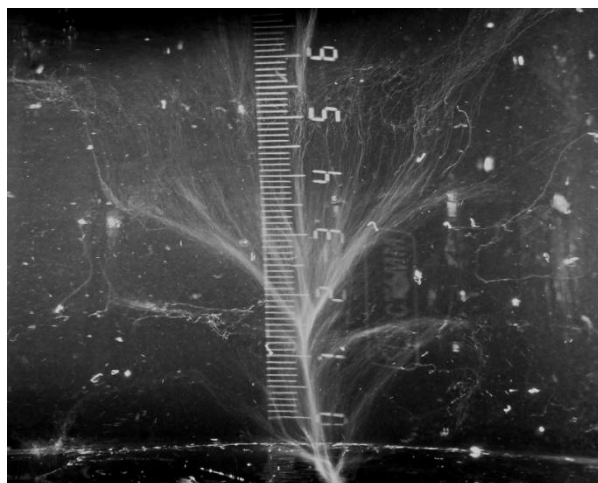


Рис.15. Частота 43,36 кГц

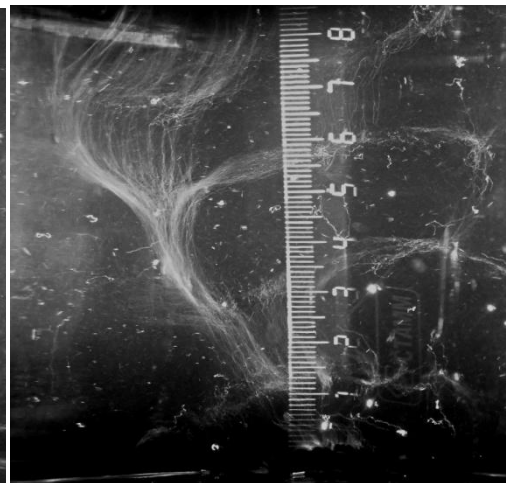


Рис. 16. Частота 44,7 кГц.

На некоторых частотах кавитационное облако принимает форму своеобразного «смерча», как на (рис. 15), однако даже здесь различимы слои пучностей и узлов стоячей волны.

На частотах выше резонансной интенсивность кавитации убывает, и кавитационное облако становится менее заметным, например, (рис. 17).

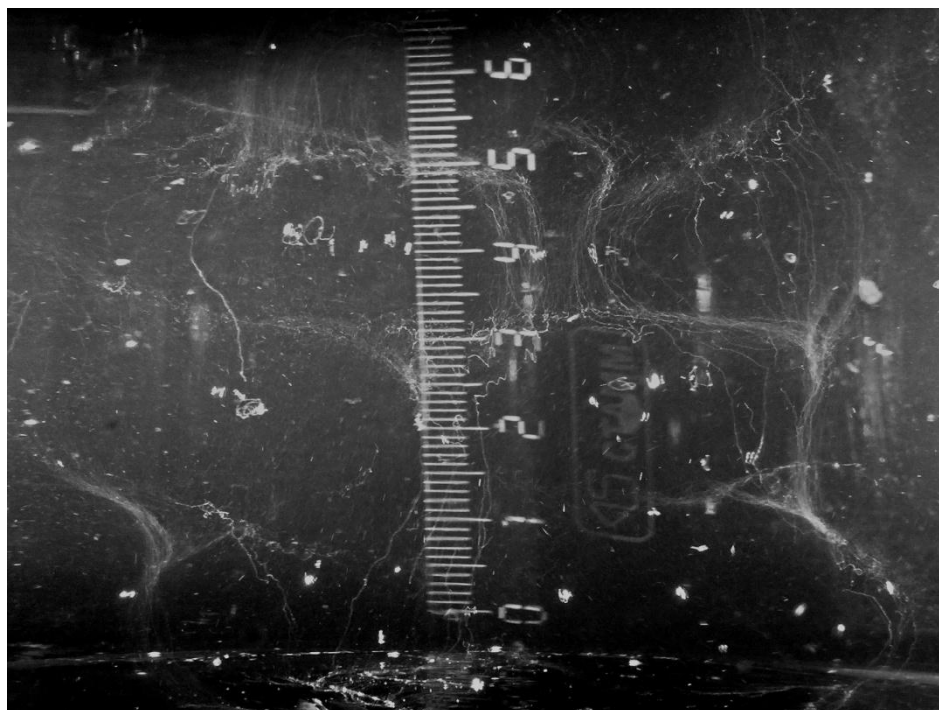
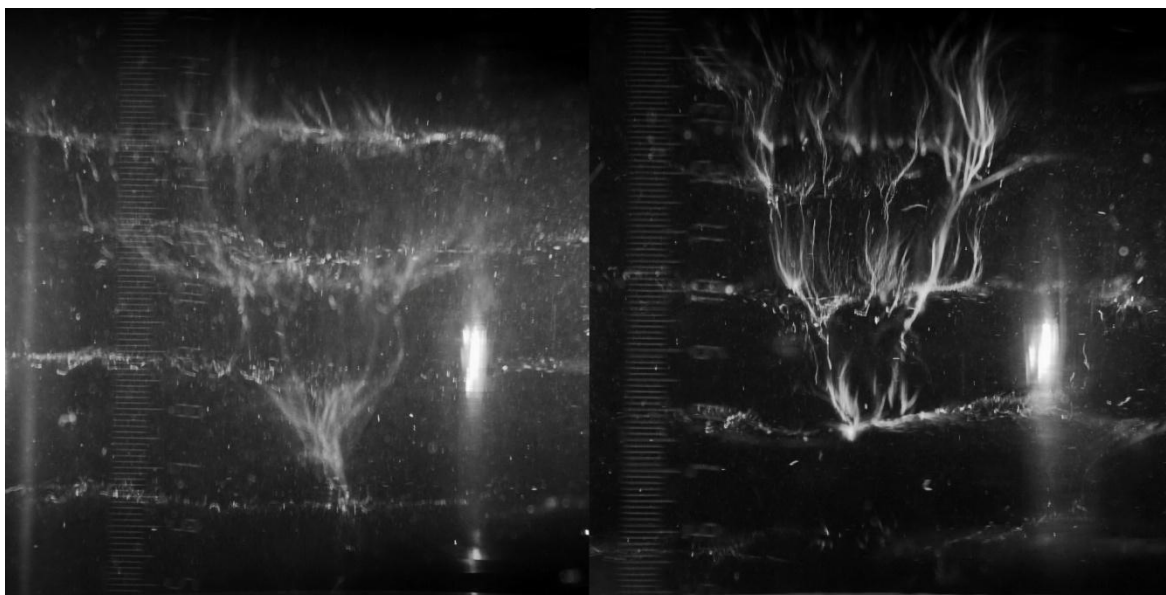


Рис. 17. Картина кавитации при частоте 46,6 кГц.

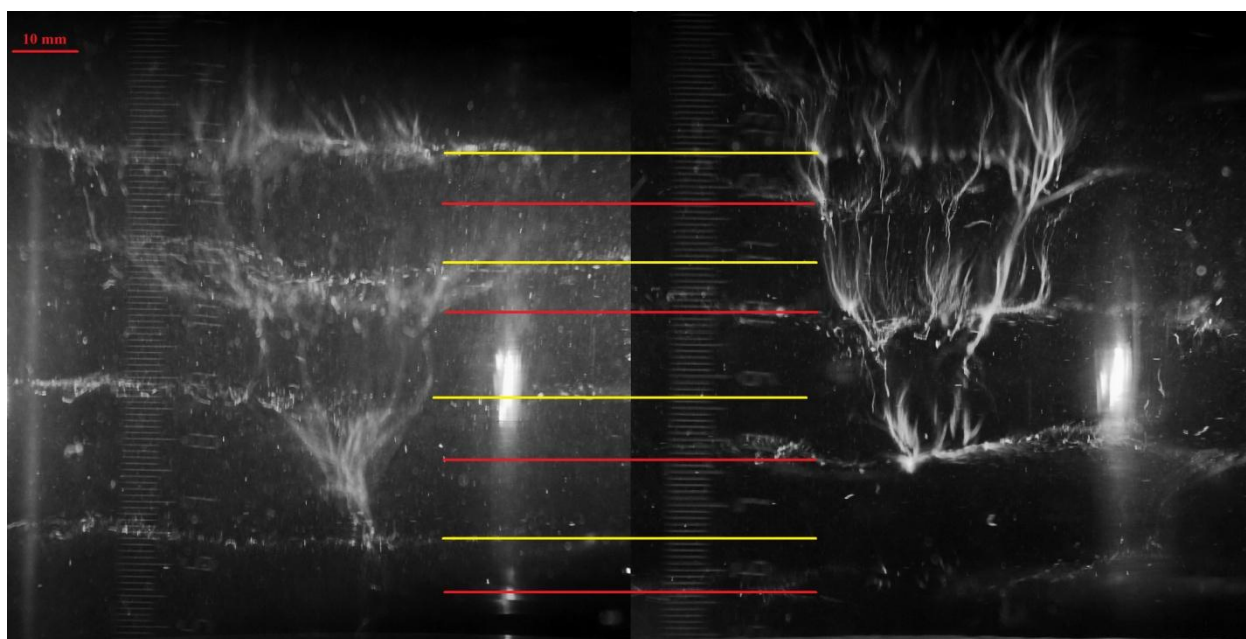
В данной работе были рассмотрены отражения от жесткой и мягкой границы. Как было показано выше, коэффициент отражения в этих случаях отличается: для жесткой границы $R=1$, а для мягкой $R=-1$. В первом случае на границе давление акустической волны удваивается и возникает пучность, а во втором случае сумма давлений равна нулю и на границе возникает узел стоячей волны. На (рис. 18) можно видеть, что пучности, в которых собираются паровые пузырьки, для этих двух случаев отстают друг от друга на четверть длины волны.



а

б

Рис. 18. а) Отражение от жесткой границы б) Отражение от мягкой границы



а

б

Рис. 19. а) Отражение от жесткой границы б) Отражение от мягкой границы

Частота излучения (рис. 17, 18) $f=40,0$ kHz в случае с жесткой границей (рис. 17, а) и $f=40,9$ kHz в случае с мягкой границей (рис. 19, б). На (рис. 19) красными линиями выделены пучности стоячей волны при отражении от мягкой границы, соответственно желтыми линиями пучности стоячей волны

при отражении от жесткой границы. Как можно видеть на (рис.19) расположение пучностей стоячей волны в этих двух случаях сдвинуто на четверть длины волны, что согласуется с расчетом.

В этом эксперименте жесткой границей служил стальной цилиндр с плоским основанием и коэффициентом отражения в воде $R=0,9$, что достаточно близко к 1. Для реализации мягкой границы использовался кусок пенопласта с плоской поверхностью. Коэффициент отражения пенопласта $R= -0,9$, что тоже близко к -1.

Во втором опыте использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой, изображена на (рис.9). Излучатель помещался в прямоугольный аквариум с водой, установленный на ребро, таким образом плоская волна падала на угол 90° . В угле возникала стоячая волна. Картина кавитационного облака (рис 20, 21), как и ожидалось, значительно отличалась от картины в первом опыте со стоячей волной в цилиндрическом сосуде при отражении акустической волны от плоской поверхности.

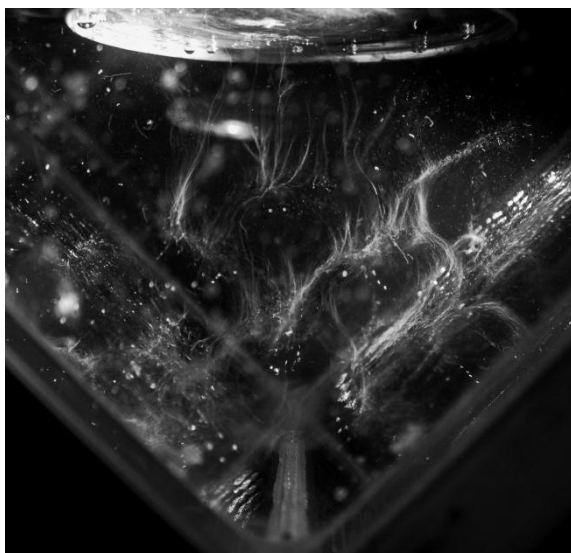


Рис. 20.



Рис. 21.

Картины стоячей волны в угле.

При изменении частоты звуковой волны очень быстро меняется и картина стоячей волны, на (рис. 22) можно проследить эволюцию кавитационного

облака в угле, при изменении частоты акустической волны. При установлении некоторой частоты картина распределения пузырьков испытывает некоторый переходный процесс. Интенсивность газовой кавитации сильнее именно в момент изменения частоты, однако после того, как выставлена постоянная частота, интенсивность кавитации начинает убывать до некоторого момента, после чего практически не меняется.

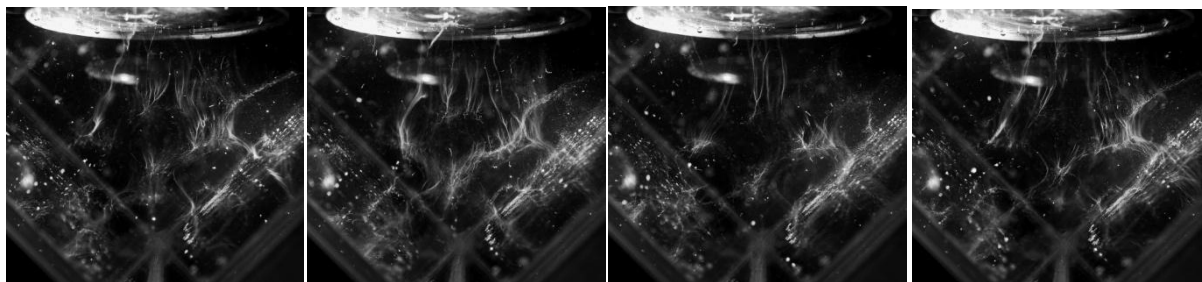


Рис. 22. Изменение кавитационного облака.

Стойкая волна в угле принимает интересную форму «решетки», на ребрах которой пучности стоячей волны (рис. 23), эта картина похожа на (рис. 5), полученную аналитически.

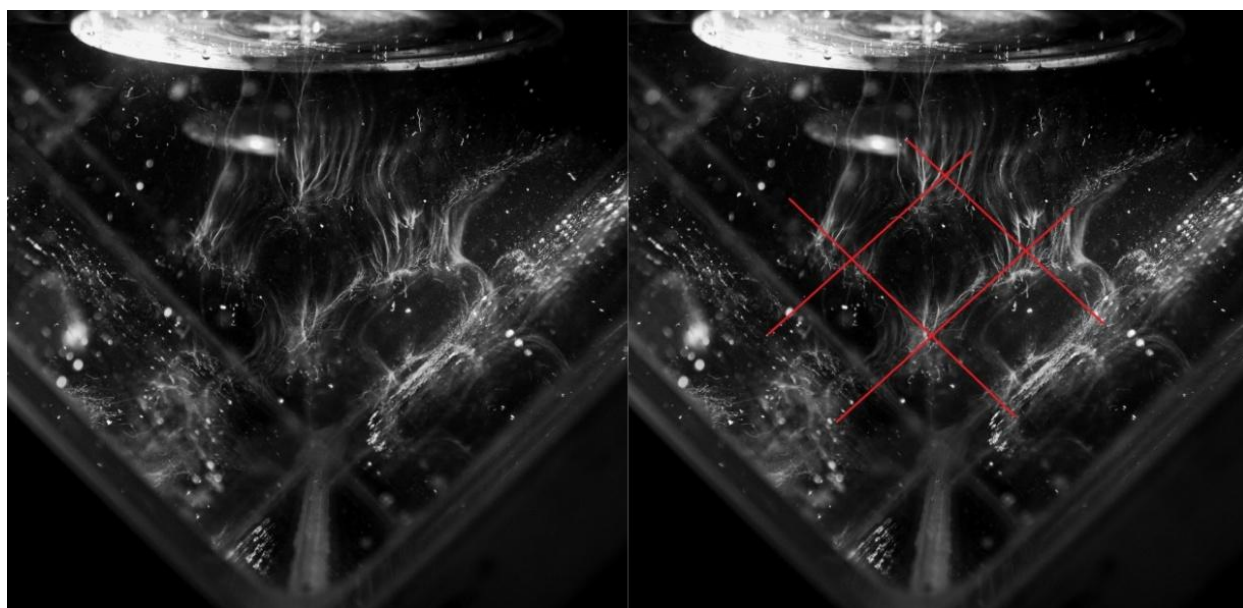


Рис. 23. Стоячая волна в угле.



Рис. 24. Стоячая волна в угле.

Картина принимает совсем иной вид при более низких частотах (рис. 24), форма решетки пропадает, и газовая кавитация концентрируется на оси излучателя.

В третьей части работы было рассмотрено отражение плоской акустической волны от трехмерного уголкового отражателя. В установленный на угол аквариум с водой помещался пьезокерамический излучатель. Кавитационное облако занимало весь объем жидкости. Облака паровой кавитации возникали в разных участках сосуда такой геометрии. Мы рассмотрели только некоторые из этих участков кавитационного облака.

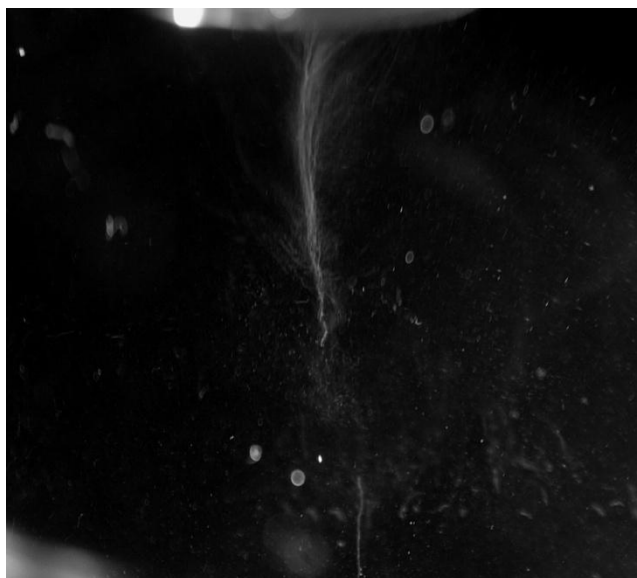


Рис. 25. Кавитация вблизи излучателя.

На частотах $f=39\div 41$ kHz вблизи излучателя из паровых пузырьков формировался «хвост» (рис. 25).

Ось излучателя была направлена к вершине уголкового излучателя, и на некоторых частотах кавитационное облако принимало вид как на (рис. 26).

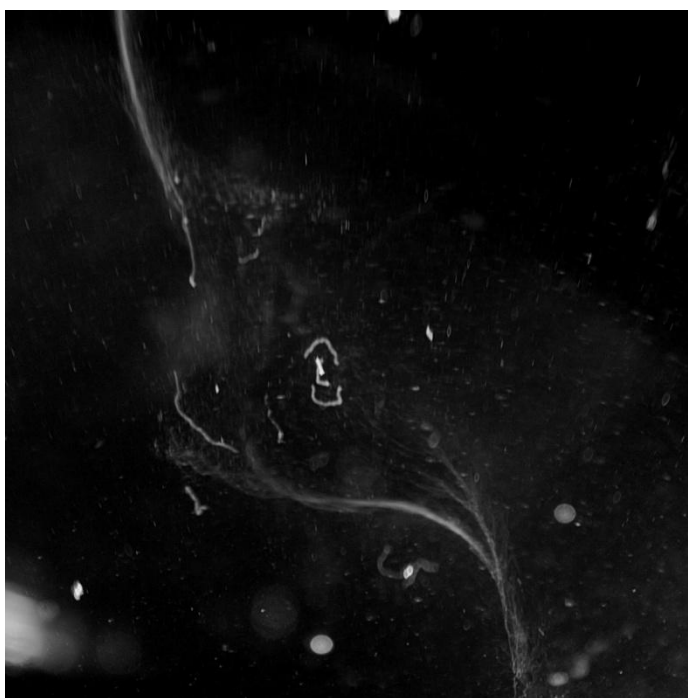


Рис. 26 Кавитационное облако вдоль оси отражателя.

В этом случае частота акустической волны была $f=37,42$ kHz. В центре возникало несколько газовых пузырьков, которые двигались по спирали в поле акустической волны, оставляя за собой видимые треки. На серии снимков (рис. 27) видно как меняется кавитационное облако.

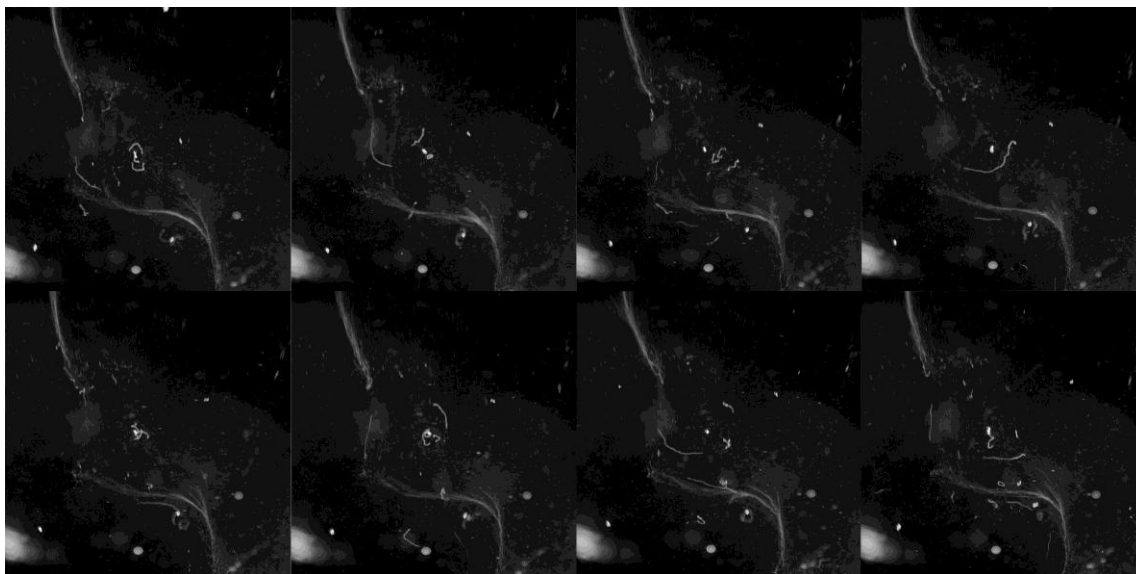


Рис. 27. Серия снимков кавитационного облака.

На этих снимках видно, как треки маленьких газовых пузырьков описывают окружности вокруг большего газового пузырька.

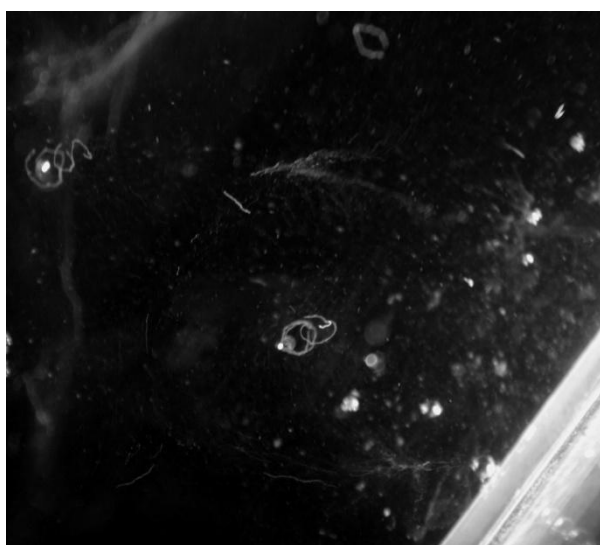


Рис. 28. Треки газовых пузырьков



Рис. 29. Треки газовых пузырьков

Такие газовые пузырьки возникали и вблизи граней углового отражателя(рис. 28, 29). На этих фотоснимках хорошо видно спиральные треки газовых пузырьков. Выдержка фотокамеры в этом случае была $\frac{1}{60}$ с, таким образом можно полагать, что газовые пузырьки в поле стоячей акустической волны двигались с довольно большой скоростью порядка $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

В четвертой части эксперимента рассматривалась стоячая волна при отражении от сферической поверхности. Для этого из пенопласта была сделана сферическая поверхность, которую мы погрузили на дно цилиндрического сосуда. Блок-схема экспериментальной установки в этом случае показана на (рис. 10). Излучатель имел диаметр 50мм.

В результате эксперимента были получены фотоснимки кавитационного облака, которое возникает в стоячей волне при отражении от сферической поверхности(рис. 30, 31).

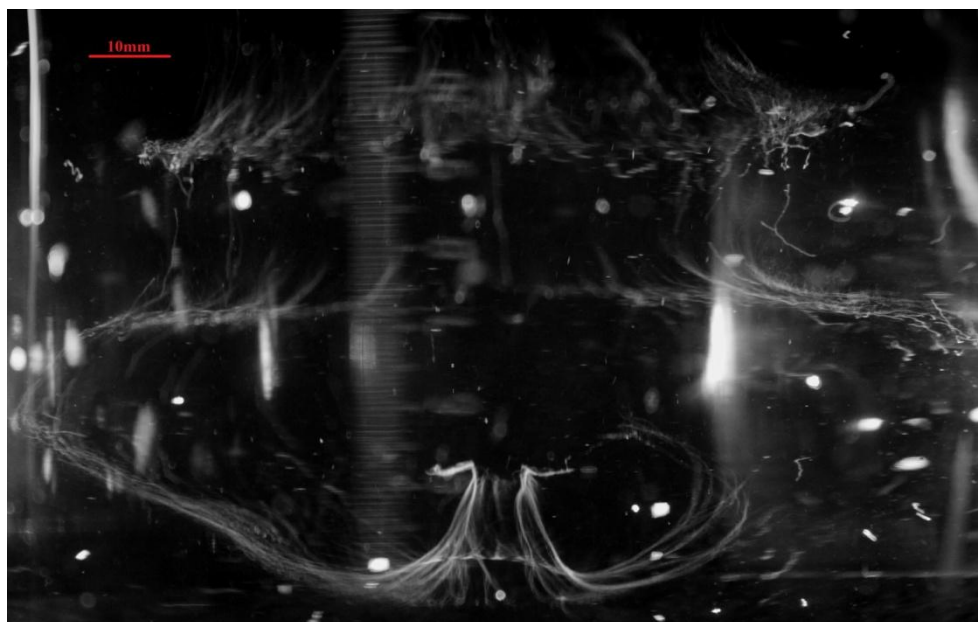


Рис. 30. Картина стоячей волны $f=46,29 \text{ kHz}$.

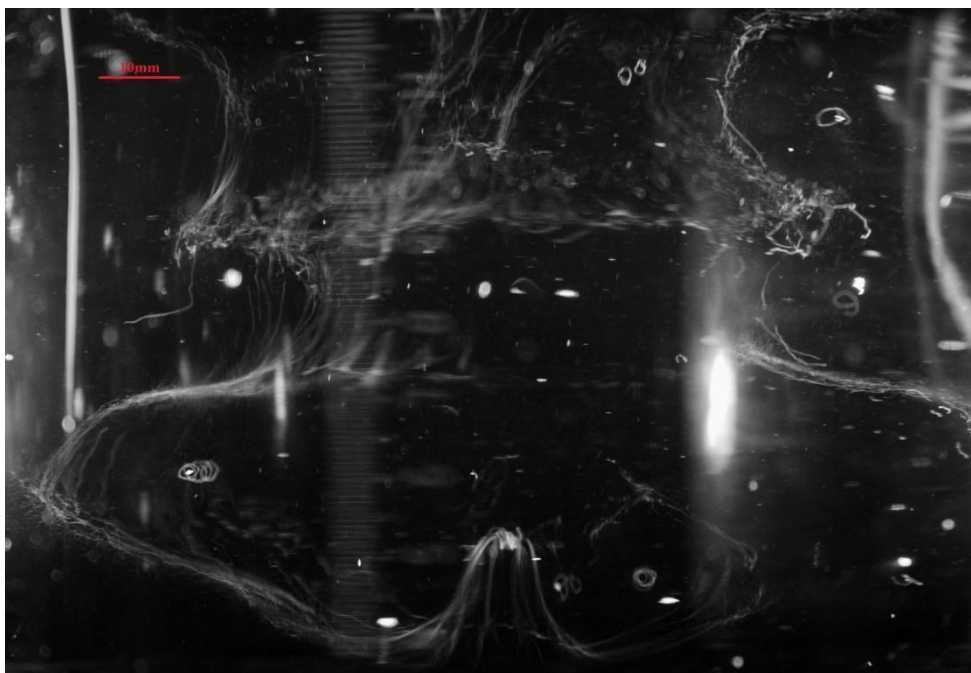


Рис. 31. Картина стоячей волны $f=46,29$ kHz.

Как и ожидалось, картина стоячей волны в этом случае (рис. 30, 31) отличается от стоячей волны при отражении плоской акустической волны от плоской поверхности (рис. 12, 13). На (рис. 30, 31, 32) видно, что в центре оси излучателя паровых пузырьков не возникает, однако вокруг оси возникают тороидальные кольца из паровых пузырьков, на разной частоте количество таких колец меняется. Можно предположить, что в случае стоячей акустической волны, отраженной от сферической поверхности, вдоль оси фомируется узел давлений, а вокруг этой оси тороидальные пучности, на поверхности которых рождаются и схлопываются паровые пузырьки. На фотографиях видно, как вблизи сферической поверхности поле акустической волны формирует пучок из паровых пузырьков - это пучность акустической стоячей волны вблизи поверхности отражения. Такой пучок возникает на оси излучателя, в центре сферической поверхности. На разных частотах он был либо вогнут внутрь к отражающей поверхности, либо выгнут наружу в сторону излучателя, последний случай продемонстрирован на (рис. 30, 31, 32).

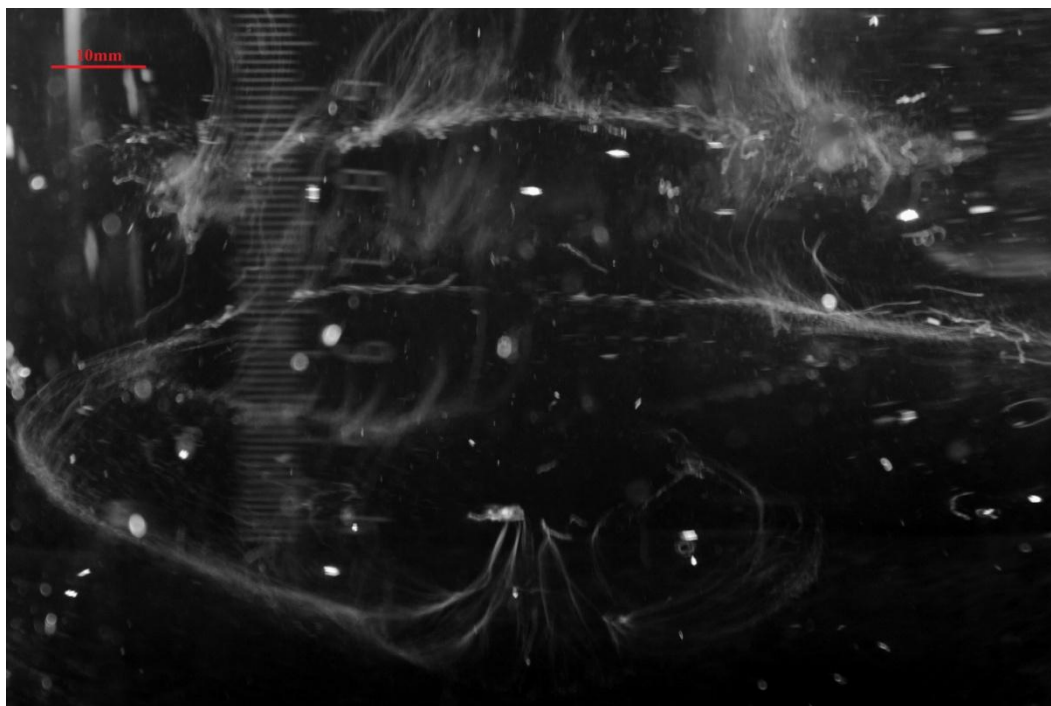


Рис. 32. Картина стоячей волны $f=46,29$ kHz.

Фотоснимок (рис. 32) сделан не под прямым углом к оси сосуда, поэтому здесь хорошо видно кольца паровых пузырьков.

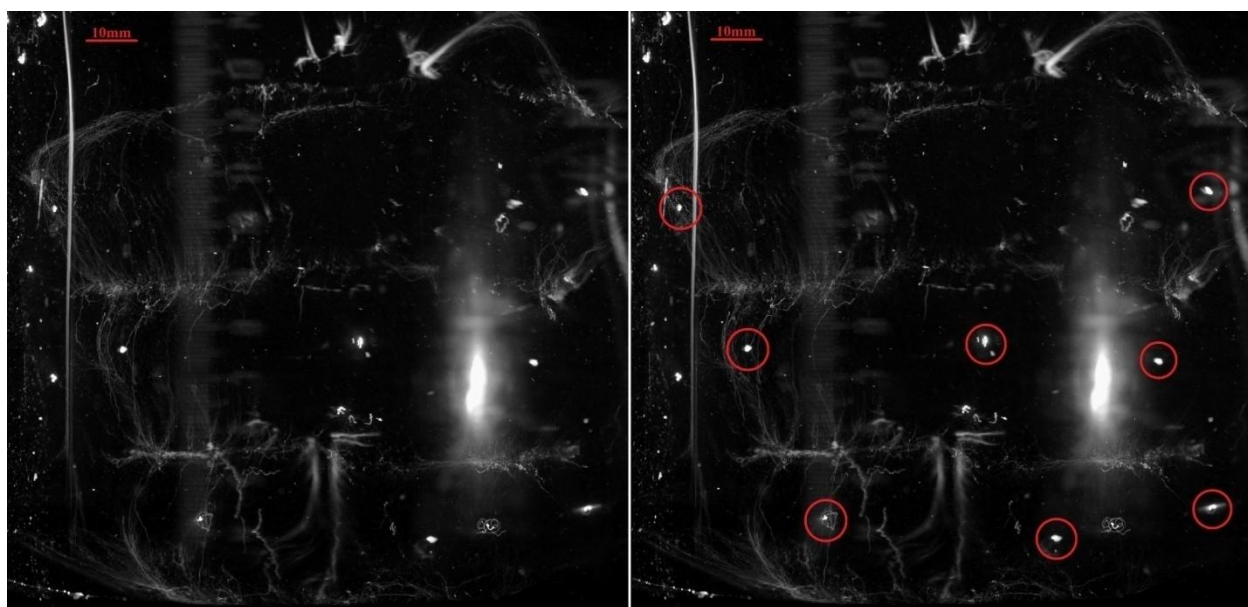


Рис. 33. Картина стоячих волн, красным выделены газовые пузырьки, $f=39$ kHz

На (рис. 33) красными кругами выделены газовые пузырьки, которые находятся в узлах стоячей волны. Таким образом видно, что в центре торов на

поверхности, которых паровые пузырьки, содержатся узлы стоячей волны, в которых сидят газовые пузырьки.

Выводы

В результате работы был получен и обработан большой массив данных, который содержит более тысячи фотографий паровой и газовой кавитации, с помощью которой были визуализированы стоячие акустические волны в сосудах с разной геометрией. Мы рассмотрели стоячие акустические волны в цилиндрическом сосуде с водой, акустические волны, отраженные от двугранного угла в аквариуме, картину стоячих волн при отражении плоской волны от трехмерного уголкового отражателя и сферической поверхности.

Полученные фотографии картин стоячих волн позволяют интерпретировать некоторые из них в рамках линейных расчетов, однако имеют ряд особенностей, причиной чего, вероятно, является нелинейность среды, которая вызвана большим количеством пузырьков, которые сильно меняют акустические характеристики среды- скорость звука, сжимаемость и плотность.

Были получены снимки странных форм акустического облака, например, (рис. 14, 2), которые требуют более глубокого исследования.

Литература

1. Голубева О. В. Визуализация стоячих волн при помощи паровой и газовой кавитации, Бакалаврская работа. 2010 г.
2. Исакович М. А. Общая акустика. Наука, М., 1973 г.
3. R. Mettin, S. Luther, C.-D. Ohl, and W. Lauterborn Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model // Drittes Physikalisches Institut, 1998.
4. O.Louisnard A simple model of ultrasound propagation in cavitating liquid. Part I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation // Centre RAPSODEE, FRE CNRS 3212, University of Toulouse, 2013.
5. Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. Кавитация. М.: Мир, 1974.
6. Г.Н. Санкин, Кавитация при сферической фокусировке акустических импульсов. Ак. ж., 2006, т.52, №1.
7. Н.В. Малых, Г.Н. Санкин, Стабилизация и акустические спектры кавитационного кластера в ультразвуковом сферическом резонаторе, ЖТФ, 2010, том 80, вып. 1.
8. Е.А. Смородов, Р.Н. Галиахметов, М.А. Ильгамов, Физика и химия кавитации. Москва: Наука, 2008.